[Research Paper]

소화용 마이크로캡슐을 함유한 소화 벽지의 개발

이상섭 · 김창홍* · 김민철* · 김종상**†

주식회사 지에프아이 대표, *주식회사 지에프아이 연구원, **한국소방산업기술원 선임연구원

Development of a Fire-Extinguishing Wallpaper Containing Microcapsules

Sang-Sub Lee · Chang-Hong Kim* · Min-Chul Kim* · Jong-Sang Kim**†

CEO, GFI Co., Ltd.,

*Resercher, GFI Co., Ltd.,

**Senior Researcher, Korea Fire Institute

(Received September 29, 2020; Revised November 6, 2020; Accepted November 17, 2020)

요 약

최근의 화재 사건들을 보면 노래방, 고시원 같은 좁고 밀폐된 공간에서의 화재만이 아니라 목욕탕, 물류창고 등 넓은 공간에서의 화재가 발생하며, 특히 좁은 공간에서의 화재는 벽지를 통해 급격한 화재 확산과 그로 인해 발생하는 대량의 유독가스로 인해 골든타임이 단축되고, 현장에서 대피하지 못해 많은 인명피해가 일어나고 있다. 이에 대한 대책으로 불에 잘 타지 않는 방염성을 부여한 다양한 벽지가 개발되고 있지만, 방염 성분이 일반 벽지보다 5배 이상의 CO를 배출해 더 심각한 인명피해를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 불길 확산의 주원인인 벽지에 소화 성능을 함유시켜 화재 발생 시 대피 시간 증가 및 불길 확산 억제의 효과를 기대하는 소화 벽지를 개발했다. 일반 물풀에 소화용 마이크로 소화 캡슐을 함유해 일반 벽지의 전소 시간을 2 min에서 5 min으로 증가함을 확인했으며, 벽지 뒷면에 마이크로 소화 캡슐을 점착제 형태로 부착 후 전소 Test 및 45° 난연 시험에서 소화 유효성을 확인했으며, 열중량 분석(TGA)을 통해 반응 시작온도, Peak point, 반응 종료 온도 및 중량감소율을 확인하여 점착성 필름의 열적 특성을 확인하였으며, 시중의 방염 벽지와 비교해 유의한 결과를 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

In this study, a wallpaper with fire-extinguishing properties was developed. This wallpaper is expected to increase the evacuation time and suppress the spread of flames in case of fire. It was confirmed that the fire-extinguishing time of an ordinary wallpaper can be increased from 2 to 5 min by incorporating micro-extinguishing capsules in the general water pool. After attaching microfire-extinguishing capsules in the form of a film on the back of the wallpaper, a burning test using a torch and 45° flame retardant digestion was performed, and the thermal properties of the adhesive film were verified based on the reaction start temperature, peak point, reaction end temperature, and weight reduction rate through thermogravimetric analysis.

Keywords : Fire extinguish, Wallpaper, Micro capsule, Fire safety

1. 서 론

소방청 통계에 따르면 화재 상황에서 화염에 의한 직접적인 피해보다 유독가스로 인한 인명피해가 2배 이상 높다고 한다.

대부분 가정집이나 상가, 숙박업소에서 흔히 쓰이는 벽

지는 종이 벽지나, 실크 벽지로 화재에 매우 취약하며, 화재 발생 시 불꽃의 확산을 돕고 유독가스 분출로 인한 인명피해 발생과 질은 연기가 발생해 대피에 어려움을 주고 있다.

예를 들어 2018년 1월에 발생한 경남 밀양 세종병원에서 일어난 화재는 45명의 사망, 147명의 부상자를 냈으며 같

† Corresponding Author, TEL: +82-70-4493-8076, FAX: +82-31-986-8078, E-Mail: mchkim@gfi-aegis.com

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

Figure 1. Structural formula and 3D molecular structure of Novec 1230.

은 년도 11월에 발생해 18명의 사상자를 낸 서울 종로구 국일고시원 화재가 있다.

특히 좁은 공간에서의 화재는 연기에 의한 질식, 대피로 확보의 어려움, 소방 설비가 제대로 적용되지 않은 문제점 때문에 더 많은 재산 피해와 인명피해가 나올 수 있다⁽¹⁾.

이에 대한 대책으로 난연성이나, 방염 성분을 추가한 벽지들이 있으나, 난연과 방염 성분은 일반 벽지보다 약 5배 많은 CO를 배출하기 때문에⁽²⁾ 초기에 화재 진압이 되지 않는 경우 짧아지는 골든타임으로 인해 더 심각한 인명피해를 초래할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 유독가스가 적게 나오는 일반 벽지에 친환경 소화 약제(NOVEC-1230)를 함유한 소화용 마이크로캡슐을 함유해 화재 발생 시 화재 확산의 방지와 동시에 소화까지 가능한 벽지를 개발하고자 한다.

소화 벽지의 유효성을 확인하기 위해 한국소방산업기술원(KFI)에 45° 연소 시험과 연기 밀도 시험을 의뢰해 소화 벽지의 유효성을 확인하고, 열중량 분석을 통해 소화 약제의 함유량 및 점착형 필름의 열적 특성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 소화 약제

실험에 사용된 소화 약제는 3M 社의 Novec-1230을 사용했다. 이 소화 약제는 ‘할로젠 화합물 및 불활성 기체 소화 설비의 화재 안전기준(NPSC 107A)’에 기재된 FK-5-1-12이며, Figure 1과 같은 구조를 띠는 Perfluoro(2-methyl-3-pentanone) 퍼플루오로(2-메틸-3-펜타논)이다. Novec-1230이 열원과 접촉하면 열분해로 인해 부피가 팽창하며 열원 주변의 산소와의 반응을 지속적으로 차단하고 끓는점이 49.2 °C로 낮아 열원으로부터 열에너지를 흡수해 냉각 효과도 가진다⁽³⁾. 다른 할로젠 화합물의 소화약제들과 다르게 오존층 파괴 환경 물질로 분류되지 않았으며, 지구온난화지수 ‘1’, 잔존일은 ‘5일’ 이내로, 대기 중에 남지 않는 친환경 소화 약제이다.

2.2 시편 제작

실크 벽지는 신한벽지의 D5042-1 제품을 사용했고, 물풀은 고려씨엠씨의 고려풀을 사용했다.

소화용 벽지를 제작에 앞서 벽지 후면에 적층하여 소화

Figure 2. Production process of fire extinguishing film.

역할을 할 소화용 필름을 제작하여 소화효과를 구현할 계획으로 소화용 필름을 제작하였고, 소화용 필름의 제작은 개시제 및 모노머를 혼합하고, 올리고머 및 첨가제를 추가 투입하여 제조되는 광경화성 수지 혼합물에 소화용 마이크로캡슐을 투입 후 광경화 시켜 필름을 제작하였다. 소화용 마이크로캡슐과 광경화성 수지 혼합물은 1:1.5 중량비율로 포함하여 제조하였으며, 올리고머와 모노머는 아크릴계를 사용하였으며, 아크릴계의 특성상 쉽게 발화가 되어 소화 효과를 방해할 방지하기 위해 난연성 확보 필요에 따라 난연제를 추가 투입하였으며, 난연제는 대표적으로 브롬계, 인계 난연제 중 사람의 생활공간에 적용되는 벽지라는 것에 따라 대표적인 인계 난연제인 Ammonium phosphate (APP)를 액상형(Liquid type)과 가루(Powder type)를 5:5 중량비로 배합하여 작업성과 난연성 확보를 위해 혼합하여 사용하였다.

벽지와 소화용 마이크로캡슐이 포함된 필름을 적층 형태를 구현하기 위해, 벽지-점착제-필름-점착제 형태로 진행하였으나 필름의 고유 무게와 벽지의 무게를 지탱하기 위

한 완벽한 접착형상 및 강한 접착력을 보유하기 어려움에 따라, 광경화성 수지 혼합물을 필름 형태가 아닌 점착제 형태로 발현을 위해 올리고머와 모노머를 NP[PO]2A, IBOA, CTFA로 변경하여 올리고머와 모노머의 경계 없이 작업 및 제작을 할 수 있는 방식을 도입하였으며, UV LED 385 nm 사용했으며 35% 광량(500-600 mj)을 설정하여 벽지 위에 직도포 후 광경화를 진행 시 Line Speed를 7 m/s로 설정하여 진행하였다. UV 광중합 시 반응열이 발생하기에 열주름 현상이 일어나 공정을 방해함에 따라, 두꺼운 이형 필름(75 μ m PET linear)을 사용하여 문제점을 해결하였다. 공정의 간소화와 강한 접착력 및 완벽한 접착 형태를 확보를 위해 상기 제작 방식을 도입하여 성공적인 소화용 벽지의 모습을 구현할 수 있었다.

2.3 실험 방법

시험은 총 4가지의 실험을 진행하였으며, 각 전소 시험, 연소 시험, 연기밀도 시험, 열중량 분석을 진행하였다.

2.3.1 전소 시험방법

전소 시험은 본 실험에서 먼저 일반 벽지의 화재 취약성을 확인 및 소화용 마이크로캡슐의 유효성을 확인하기 위해 일반 실크 벽지(Condition 1), 실크 벽지에 물풀을 도배(Condition 2), 소화용 마이크로캡슐과 물풀을 5 : 1의 비율로 혼합한 뒤 실크 벽지에 도포(Condition 3), 총 3가지의 조건으로 전소 시험을 가스라이터를 이용해 진행했다. 각 Condition의 면적은 0.5 m $\times$ 0.5 m (0.25 m²)으로 고정하였으며, KFI의 45° 연소 시험과 유사한 환경에서 진행하기 위해 벽지를 철판에 부착 후 벽지 방향으로 45° 기울인 뒤 가운데 부분을 가스라이터로 점화하였고, 벽지가 발화가 시작한 시점부터 벽지의 잔여가 완전히 사라졌을 때까지의 시간을 측정하였다.

2.3.2 연소 시험방법

45° 연소 시험은 한국소방산업기술원(KFI)에서 방염 성능의 기준(KOFEIS 1001)에 따라 진행했으며, Sample은 각 1 m² 당 약 330 g으로 KFI 기준인 450 g 이하인 얇은 포와 1 m² 당 약 550 g으로 기준치인 450 g 초과인 두꺼운 포 두 가지의 Sample로 진행했다. Sample의 면적은 0.3 m $\times$ 0.21 m (0.063 m²), 불꽃의 높이는 얇은 포 45 mm, 두꺼운 포는 65 mm이며, 연소시험기의 가열 시간은 얇은 포 60 s, 두꺼운 포 120 s, 착염 후 가열 시간은 얇은 포 3 s, 두꺼운 포 6 s로 진행되었다.

2.3.3 연기밀도 시험방법

연기밀도 시험은 일정한 두께의 시료를 2.5 W/cm²의 복사열을 가하고 연소하면서 발생하는 연기에 수직 방향으로 통과되는 빛의 강도를 측정하여 연기농도를 측정하는 시험이며, 한국소방산업기술원(KFI)의 방염성능의 기준(KOFEIS

Table 1. Burned Down Test Result of Silk Wallpaper

Samples	Size (m)	Burned down time (s)		
		1	2	3
Condition 1	0.5 $\times$ 0.5	116	92	110
Condition 2	0.5 $\times$ 0.5	109	101	99
Condition 3	0.5 $\times$ 0.5	333	315	321

1001) 및 ASTM E 662에 맞는 장비로 진행되었다.

2.3.4 열중량분석(TGA) 시험방법

열중량분석(TGA)는 소화용 마이크로캡슐로 제작한 소화 필름의 열적 특성을 확인하기 위해 진행하였으며, 분석에 사용된 기기와 소모품은 NETZSH社の TG 209 F3 Tarsus 기기와 Al Crucible을 사용했으며, 시료의 양은 2.6 mg, 온도조건은 30 $^{\circ}$ C-300 $^{\circ}$ C, 승온속도 10 K/min으로 설정해 분석을 진행했다.

2.4 전소 시험

온도 27 $^{\circ}$ C, 습도 37%의 조건에서 실험을 진행했으며, Condition 1은 실크 벽지는 0.5 m $\times$ 0.5 m (0.25 m²)의 크기로 연소를 진행했으며, 실험 결과는 각 116 s, 92 s, 110 s 평균 106 s 만에 완전연소 되었다.

Condition 2는 실크 벽지 0.5 m $\times$ 0.5 m (0.25 m²)에 물풀 3.8 g, 물 121 ml를 사용해 벽지에 풀을 도포한 후 전소 시험을 진행하였고, 각 109 s, 101 s, 99 s 평균 103 s 만에 전소됐다.

Condition 3은 Condition 2에서 물풀의 접착력을 저하지 않는 선에서 소화용 마이크로캡슐을 최대한 투입해 진행했으며, 물풀과 소화용 마이크로캡슐은 1 : 5의 비율(3.8 g : 19 g)로 섞어 벽지에 바른 뒤 전소 실험을 진행했다. 결과는 각 333 s, 315 s, 321 s 평균 323 s로 Condition 1보다 약 3.05배, Condition 2보다 약 3.14배 더 늦게 전소가 됐다 (Table 1).

2.5 45° 연소 시험

45° 연소 시험은 법제처 국가법령정보센터의 방염성능 기준에 따라 1 m²의 무게가 450 g 이하인 얇은 포와 1 m²의 무게가 450 g 이상인 두꺼운 포 두 가지의 Sample로 진행했으며, 벽지류의 방염성능기준은 아래 Table 2와 같다.

전소 시험을 통해 유효성을 확인한 소화용 마이크로캡슐을 점착성을 갖는 필름 형태로 제작 벽지 뒷면에 적층 구조로 제작해 소화력의 테스트를 진행했으며, 결과는 아래 Table 3, 4와 같다.

0.25 mm 두께의 얇은 포 시료는 방염성능기준을 충족하지 못하고 전소하였으며, 0.5 mm의 두꺼운 포 시료는 잔신 시간 0 s, 잔염 시간 0 s, 평균 탄화 면적 27.8 cm, 평균 잔신 길이 7.9 cm로 방염성능기준인 40 cm, 20 cm 보다

Table 2. Fire Resistance Performance Standard of Wall Paper

Measurement item	Standard	
	Thin paper	Thick paper
After glow time (s)	3	5
After flame time (s)	5	20
Char area (cm)	30	40
Char length (cm)	20	20

Table 3. 45° Combustion Test Result (Thickness 0.25 mm)

Measurement item	Result		
	1	2	3
After glow time (s)	Burned down		
After flame time (s)			
Char area (cm)			
Char length (cm)			

Table 4. 45° Combustion test Result (Thickness 0.5 mm)

Measurement item	Result		
	1	2	3
After glow time (s)	0.0	0.0	0.0
After flame time (s)	0.0	0.0	0.0
Char area (cm)	26.9	28.6	27.8
Char length (cm)	7.7	8.1	7.8

Table 5. Smoke Density Test

Sample	Standard	Smoke density		
		1	2	3
Thin paper (0.25 mm)	200 or less	71.0	76.0	82.0
Thick paper (0.5 mm)	200 or less	113.6	115.1	112.8

30.5%, 60.5% 낮게 측정되어 방염성능을 충족하였다.

2.6 연기 밀도시험

Table 5는 식 (1)에 의해 계산하여 나온 최대연기밀도 측정값은 얇은 포 시료는 71.0, 76.0, 82.0 평균 76.3으로 시료 내 유기 물질의 함유량이 낮아 연기밀도도 현저히 낮게 측정되었으며, 두꺼운 포 시료는 113.6, 115.1, 112.8 평균 113.8로 한국소방산업기술원(KFI)의 방염 기준 200보다 각 64.5%, 43.2% 낮게 측정되었을 뿐 아니라 동일한 ASTM E 662 기준으로 측정한 시중에 판매되고 있는 방염 실크 벽지의 경우 36.8% 높은 약 180으로 측정되었다⁽⁴⁾.

연기밀도시험은 연기밀도(Ds)는 아래 식 (1)에 의해 계산한다.

Figure 3. Smoke density test. **Figure 4.** TGA of fire extinguish film.

$$Ds = G (\log_{10} (100/T)) \quad (1)^{(5)}$$

G (연기밀도의 챔버의 기하학적 요소) = $V/(A \cdot L)$

V = 실험챔버의 용적(m^3)

A = 실험체의 폭로 면적(m^2)

L = 연기를 통과하여 빛이 지나간 길이(m)

T = Photo multiplier (PM) 마이크로광도계 투과율(%)

2.7 열중량 분석(TGA)

본 연구를 위해 제작된 점착성을 갖는 소화용 마이크로 캡슐을 포함한 점착형 필름층에 함유된 소화 약제와 반응 시작온도, Peak point를 확인하기 위해 열중량 분석(TGA)를 진행했으며, 그 결과는 아래의 Figure 4와 같다.

사용된 시편의 무게는 2.6 mg로써 시편에 내재되어 있는 소화용 마이크로캡슐이 승온에 따라 소화 약제가 상변이와 동시에 부피팽창으로 인해 소화 약제가 분출됨으로 - 62.23% 질량 감소의 그래프를 보이며 반응 시작 온도(Onset)은 138.6 °C를 나타내며, 반응의 종료 온도는 151.5 °C를 나타낸다. 가장 활발히 반응하는 온도는 144.0 °C인 Peak point를 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구를 통해 일반 실크 벽지를 전소 실험, 45° 연소 실험, 연기밀도 측정을 진행함으로써 방염 벽지보다 뛰어난 성능을 가지는 결과값을 아래와 같이 확인되었으며, 열중량 분석(TGA)를 통해 점착형 소화 필름의 반응 시작온도, Peak point, 반응 종료 온도 및 중량감소율을 확인하여 열적 특성을 아래와 같이 확인했다.

1) 일반 실크 벽지에 소화용 마이크로캡슐이 적용되면 벽지의 전소를 지연시키며, 이로 인해 화재의 확산을 지킬 수 있음을 확인했다.

2) 소화용 마이크로캡슐 점착성 필름층의 두께가 0.5 mm 이상일 때 벽지의 방염성능기준을 충족시키며, 잔염, 잔신시간이 0 s로 소화 벽지 내의 소화용 마이크로캡슐이 소모되기 전까지 화재현장의 골든타임을 확보할 수 있음을 확인했다.

3) 45° 연소 실험에서 방염 기준을 충족한 0.5 mm의 시료의 경우 연기밀도 시험에서도 기준치인 200보다 43.2% 낮게 측정되었고, 시중에서 판매되는 방염 실크 벽지의 연기밀도 180보다도 약 36.8% 더 낮게 측정되어 피난 시 더 도움이 될 것으로 판명되었다.

4) 소화용 필름의 열중량 분석결과 반응 시작온도는 138.6 °C로 5 min 내로 200 °C까지 도달하는 주택 화재 내에서⁽⁶⁾ 화재 초기에 반응할 수 있음을 확인했다.

후 기

본 연구는 KFI 실용화과제의 지원을 받아 수행되었으며,

관계제위께 감사드립니다.

References

1. J. H. Hong, "A Study on Safety Evacuation in the Goshiwon", Master's Thesis, Graduate School of Engineering, Kyonggi University, p. 1 (2019).
2. Y. J. Park and H. Y. Lee, "A Study on the Combustion Characteristics of the Interior Wallpaper in the Residential Fires", J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 16, No. 2, pp. 263-264 (2016).
3. T.-G. Jeon, "A Study on the Performance Characteristic of Automatic Fire Extinguisher System Using Eco-friendly Form Fire Extinguisher Agent", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical System Engineering, The Graduate School, Tongmyong University, p. 11, 23 (2020).
4. K.-H. Oh, Y.-Y. Choi and S.-E. Lee, "A Study on the Combustion Characteristic of Wall Paper", Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 21, No. 1, p. 97 (2007).
5. Y.-Y. Choi, S.-E. Lee and K.-H. Oh, "A Study on the Combustion Characteristics of Wall Decoration Papers", Proceedings of 2006 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, p. 325 (2006).
6. Y. I. Lee and H. J. Kim, "An Analysis of the Developmental Characteristic of Housing Fire", J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 18, No. 4, pp. 216-217 (2018).